

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

⑫ 公開特許公報 (A) 平2-32323

⑩ Int. Cl.⁵

G 02 F 1/35
 H 01 S 3/06
 3/08
 3/10
 3/30

識別記号

府内整理番号

⑬ 公開 平成2年(1990)2月2日

C
Z

7348-2H
 7630-5F
 7630-5F
 7630-5F

H 01 S 3/08

Z

審査請求 未請求 請求項の数 4 (全9頁)

⑭ 発明の名称 光パルス列発生法および装置

⑮ 特願 昭63-180210

⑯ 出願 昭63(1988)7月21日

⑰ 発明者 中沢 正隆 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本電信電話株式会社内

⑰ 発明者 鈴木 和宣 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本電信電話株式会社内

⑰ 出願人 日本電信電話株式会社 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号

⑰ 代理人 弁理士 谷 義一

明細書

1. 発明の名称

光パルス列発生法および装置

2. 特許請求の範囲

1) 自己位相変調効果を誘起できる分散性媒質により光共振器を構成し、該光共振器に高出力の比較的パルス幅の広い光パルスを入射せしめ、その光パルスの前記光共振器内での伝搬時間を前記光パルスの繰り返し周期の整数倍に同期させることにより、前記分散性媒質中の変調不安定性により前記光パルスを繰り返し周波数が数THzの超高速パルス列に変換し、さらに前記光共振器の正帰還効果により超高速繰り返しパルス列を周囲として、光パルス発振を行なうことを特徴とする光パルス列発生法。

2) 請求項1記載の方法において、前記光パルスの代りに高出力の連続光を用い、該連続光と前記

変調不安定性の周波数だけ周波数シフトした第2の連続光とを同時に前記光共振器に入射させ、その入射光の当該光共振器内での伝搬時間を前記変調不安定性によって生ずる光パルス列の周期の整数倍に同期させることにより、前記光共振器内に定期的に超高速光パルス列を発生させることを特徴とする光パルス列発生法。

3) 高出力の比較的パルス幅の広い光パルスを発生する励起光源と、

自己位相変調効果を誘起できる分散性媒質により構成した光共振器と、

前記励起光源からの前記光パルスを前記光共振器に入射せると共に、前記光共振器から光パルス列を出力する手段と、

前記光共振器の途中に配置され、前記光共振器の共振器長を可変となし、それにより、前記光パルスの前記光共振器内での伝搬時間を前記光パルスの繰り返し周期の整数倍に同期させる手段とを具え、前記分散性媒質中の変調不安定性により

前記光パルスを繰り返し周波数が数MHzの超高速パルス列に変換し、さらに前記光共振器の正帰還効果により超高速繰り返しパルス列を周期として、光パルス発振を行なうようにしたことを特徴とする光パルス列発生装置。

された出力光の前記光共振器内での伝搬時間を前記変調不安定性によって生ずる光パルス列の周期の整数倍に同期させる手段と
を具え、前記光共振器より超高速光パルス列を発生させるようにしたことを特徴とする光パルス列発生装置。

4) 高出力の第1の連続光を発生する第1光源と、

自己位相変調効果を誘起できる分散性媒質により構成した光共振器と、

前記分散性媒質中の変調不安定性の周波数だけ周波数シフトさせた第2の連続光を発生する第2光源と、

前記第1および第2の連続光を合成する手段と、

その合成された出力光を前記光共振器に入射させると共に、前記光共振器から光パルス列を出力する手段と、

前記光共振器の途中に配置され、前記光共振器の共振器長を可変となし、それにより、前記合成

(以下余白)

3. 発明の詳細な説明

【産業上の利用分野】

本発明は、超高速光通信においてその光源となる超高速光パルス列を発生させる方法および装置に関するものである。

【従来の技術】

従来、光パルスを発生させる方法としては、①レーザーのモード同期技術またはQスイッチ技術を使用する方法、②周波数が時間的に変化する波を分散性媒質中に通過する方法等が主であった。

①のレーザーのモード同期技術について説明すると、まずレーザー共振器内部にFMもしくはAM変調器を挿入し、共振器の往復伝搬時間で決定される繰り返し周波数でレーザー電場を変調する。この結果、レーザーの発振周波数の横モードが互いに引き込みを起こし、各モードが一定の位相関係をもって発振する。この結果、レーザー媒質の帯域で決定されるバルス幅をもつバルスが発生でき

る。

この方法は今日においてもレーザー技術の最も重要なものであり、YAG レーザーにおいては繰り返し周波数 100MHz で 100ps (100×10^{-12} 秒) 程度、色素レーザーでは繰り返し周波数 50～200MHz で 0.1～1ps 程度のバルスを発生できる。レーザーのモード同期の理論に関しては、A.Yariv 著 “光エレクトロニクスの基礎” 丸善株式会社（多田邦雄、神谷武志共訳）6.6 章 (P.120～137) もしくは畠田光一著 “量子エレクトロニクス上巻” 岩波房、第2章 (P.166～199) に説明されている。また、色素レーザーにおける光バルスの最近の報告としては、

M.Nakazawa, T.Nakashima, H.Kubota, and S.Seikai “65-femto second pulse generation from a synchronously pumped dye laser without a colliding-pulse mode-locking technique” 米国 Optics Letters vol.12, No.9 P.681～683 (1987) がある。

モード同期技術は短バルスを発生させる方法と

しては大変有効であり、大抵の場合にこの方法に依存しているといつてよい。しかし、高速繰り返しにはおのずと制限がでてくる。これは、共振器の光の往復時間を用いていためであり（共振器長をし、光速をCとすると往復時間Tは $T = 2L/C$ となる）、 $L = 1\mu$ とすると、150MHzの繰り返し周波数となる。これ以上に繰り返し周波数を増大させるためには、共振器長を短くする必要があるが、共振器長が短い半導体レーザーを用いたとしても、30GHz～100GHz程度が限界である。

また、Qスイッチ法は共振器長とは無関係であるが、反転分布のON-OFFを用いるため、高出力パルスは得られるものの、その繰り返し周波数は100kHz程度が限界である。しかもまた、この方法ではレーザーの継モードを制御しないため、パルス幅も数10ns～μsと大きい。

以上に述べてきたモード同期法およびQスイッチ法の構成例を第7図および第8図に、それぞれ示す。ここで、1および1'はレーザーミラー、2はレーザー媒質である。第7図において

有望視されている。まず、高出力であり、かつパルス幅が比較的大きい入力パルスを光ファイバ7に入射させる。この光ファイバ7中の非線形効果の1つである自己位相変調効果と群速度分散により、正にチャーブしたパルスを作り出す。そのパルスを第9図の方法と同様の分散性媒質6（この場合には2枚の回折格子6aと6bを平行に向い合わせて配置した装置）を通過させることにより、超短パルス化が可能となる。しかし、この方法においても、繰り返し周波数を1GHz以上にすることは、入力パルスがモード同期パルスであるため難しい。

従来技術としては、前述した方法以外に、非線形性を用いる方法として、光ソリトン発生法および共振器を有しない変調不安定性法がある。光ソリトンは光ファイバ中での自己位相変調効果と負の群速度分散とが釣り合うことによって発生し、1ps以下のパルスを比較的高い繰り返し周波数で発生できる。変調不安定性（Modulational Instability、以下ではMIと略す）は、高出力の

て、3はAMもしくはFMのモード同期素子（モードロッカー）であって、超音波光偏向器で構成できる。第8図において、4はQスイッチ素子であり、やはり光偏向器を用いて構成でき、これによりレーザー共振器のQ値を制御する。

次に、②の方法を電気光学効果を用いて実現する方法を第9図に示し、同じく光ファイバと回折格子対を用いて実現する方法を第10図に示す。第9図においては、單一周波数の連続波を入力波として用意し、その入力波をLiNbO₃、LiTaO₃等の周波数および位相変調が可能な光変調器5に通すことにより、その入力波の周波数が時間的に変化した波に変化させる。その波を分散性媒質6に通過させることにより、パルス波を得ることができる。この方法では任意の繰り返し周波数のパルスを形成できる利点があるが、変調器の応答速度が電気的要因から100GHz程度となってしまうため、それ以上の高速性は望めない。

第10図の方法は、最近10フェムト秒（ 10×10^{-15} 秒）程度のパルスを発生させる方法として

連続波を負の群速度分散に入射すると僅かな雑音が周期性をもってパルス化する現象であり、高繰り返し周波数のパルスを発生できる。いずれもBell研究所のA.Iasegawaによって提案されている。しかし、MIについてはパルス化するものの、実験的にはその変調度が浅いため、パルスとは言いたいところがある。

[発明が解決しようとする課題]

以上概説してきたように、これまでに数多くの光パルス発生法があるものの、1THz(10^{12} Hz)の繰り返し周波数をもつ光パルスを発生できる光パルス装置は実現していなかった。

そこで本発明の目的は、以上述べてきた光パルス列の高繰り返し特性の上限をいっしきよに100倍程度高めて、超高速のパルス列を発生させる方法および装置を提供することにある。

[課題を解決するための手段]

このような目的を達成するために、本発明方法

は、自己位相変調効果を誘起できる分散性媒質により光共振器を構成し、光共振器に高出力の比較的パルス幅の広い光パルスを入射せしめ、その光パルスの光共振器内での伝搬時間を光パルスの繰り返し周期の整数倍に同期させることにより、分散性媒質中の変調不安定性により光パルスを繰り返し周波数が数THzの超高速パルス列に変換し、さらに光共振器の正帰還効果により超高速繰り返しパルス列を周期として、光パルス発振を行なうことと特徴とする。

本発明方法の他の形態は、光パルスの代りに高出力の連続光を用い、連続光と変調不安定性の周波数だけ周波数シフトした第2の連続光とを同時に光共振器に入射させ、その入射光の光共振器内での伝搬時間を変調不安定性によって生ずる光パルス列の周期の整数倍に同期させることにより、光共振器内に定常的に超高速光パルス列を発生させることと特徴とする。

本発明装置は、高出力の比較的パルス幅の広い光パルスを発生する励起光源と、自己位相変調効

と、光共振器の途中に配置され、光共振器の共振器長を可変となし、それにより、合成された出力光の光共振器内での伝搬時間を変調不安定性によって生ずる光パルス列の周期の整数倍に同期させる手段とと見え、光共振器より超高速光パルス列を発生させるようにしたことを特徴とする。

[作用]

本発明では、分散性媒質中の非線形波動の伝搬の際、発生する変調不安定性を光共振器の中で実現し、その利得によりTHz領域でのパルス列を発振させる。従来のモード同期法、Qスイッチ法、および光変調器による方法とは、分散性媒質中の非線形性を用いる点が異なり、この結果、従来不可能であったTHz繰り返しのパルス列を発生させることができる。

本発明では、従来技術としての非線形効果によるパルス発生にあたって、光共振器内での正帰還効果を利用することにより、光共振器内に定常的なパルスを誘起させることにより、100%近い変

換を誘起できる分散性媒質により構成した光共振器と、励起光源からの光パルスを光共振器に入射させると共に、光共振器から光パルス列を出力する手段と、光共振器の途中に配置され、光共振器の共振器長を可変となし、それにより、光パルスの光共振器内での伝搬時間を光パルスの繰り返し周期の整数倍に同期させる手段とと見え、分散性媒質中の変調不安定性により光パルスを繰り返し周波数が数THzの超高速パルス列に変換し、さらに光共振器の正帰還効果により超高速繰り返しパルス列を周期として、光パルス発振を行なうようにしたことを特徴とする。

本発明装置の他の形態は、高出力の第1の連続光を発生する第1光源と、自己位相変調効果を誘起できる分散性媒質により構成した光共振器と、分散性媒質中の変調不安定性の周波数だけ周波数シフトさせた第2の連続光を発生する第2光源と、第1および第2の連続光を合成する手段と、その合成された出力光を光共振器に入射させると共に、光共振器から光パルス列を出力する手段

調度をもつ変調、すなわち完全な超高速光パルス列を作り出す。この光共振器を利用した非線形波動の発振現象は、光パルスの発生ばかりでなく、プラズマ、および流体等においても実現可能であり、幅広い各種パルス発生に適用できる。

[実施例]

以下に、図面を参照して本発明の実施例を詳細に説明する。

第1図は本発明の第一の実施例を示す構成図であって、ここで、7は非線形効果の一つである自己位相変調効果を誘起できる分散性媒質、たとえば1.2μm, 1.3μmおよび1.5μm帯に零分散をもつ单一モード光ファイバによる光ファイバ共振器、8は励起光源、たとえば、高出力半導体レーザー、1.3μm帯YAGレーザーもしくはKCl-NaCl結晶を用いたカラーセンターレーザーによる光源である。9は光ファイバ共振器7から励起光源8への反射を取り除く光アイソレーターである。10は偏波依存性のある半透過鏡であり、11は

および11'は光ファイバ共振器7へのビーム結合用レンズである。12は光ファイバ共振器7の共振器長を可変し、この光共振器7内の光の伝搬時間を励起光源8からの励起光の繰り返しに正確に一致させるために調整を行う可動形のコーナーキューブである。13は光ファイバ共振器7の出射端における梢円偏光を直線偏光にし、かつ偏光方向を任意の方向に制御できる偏光制御素子であり、励起光の波長に対して1/4波長板と1/2波長板とから成る。

この装置を動作させるには、励起光源8からの比較的幅広の光パルスを、光アイソレータ9から半透過鏡10を介し、さらに結合レンズ11を経て、光ファイバ共振器7に結合する。その光パルスが光ファイバ中を伝搬していくにつれて、パラメトリックな雑音から発生した変調不安定性により、幅広の光パルスの上に非常に細いパルス列が形成され始める。

このようにして、変調の浅いリップルをもった光ファイバからの出力パルスは、コーナーキュー

変調不安定性(M1)の利得を g_{MI} とすると、 g_{MI} は、

$$g_{\text{MI}} = \frac{k^2 + \Omega^2}{2} \left(-\frac{2\omega n_2 |E|^2}{c(k^2 + \Omega^2)} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

と表わすことができる。ここで、 k^2 は光ファイバの群速度分散 $\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}$ であり、 Ω は変調の周波数、 ω は励起光(キャリア)周波数、 c は光速、 n_2 は非線形屈折率、 $|E|^2$ は入力電場のパワー密度である。最大利得は $g_{\text{MI}}(\Omega)$ を Ω に関して微分することによって得られ、その変調周波数 Ω_{max} は

$$\Omega_{\text{max}} = \left[\frac{2\omega}{c} \left| \frac{n_2}{k^2} E^2 \right| \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

で与えられ、最大利得は g_{max} は

$$g_{\text{max}} = \frac{1}{2} n_2 \frac{\omega}{c} |E|^2 \quad (3)$$

で与えられる。例えばパルス $|E|^2 = 10^{-20} \text{W}$ 、パルス幅13ps、有効断面積 $5 \times 10^{-7} \text{cm}^2$ 、 $n_2 = 3.2 \times 10^{-16} \text{cm}^2/\text{W}$ (シリカ系ガラス)、波長 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ とすると、 g_{max} は $2 \times 10^{-2} (1/\text{s})$ となり、

ブ12および偏波制御素子13を経て半透過鏡10に入射する。ここで、半透過鏡10は偏波依存性を有するので、偏波制御素子13を回転させて、出力の一部分が透過するよう設定する。また、偏波制御素子13からの出力が、半透過鏡10上において堆積して入射している励起光パルスと並なるように、コーナーキューブ12を移動させて同期をとる。なお、かかる出力は半透過鏡10で反射されて、取り出される。

このように設定すると、光ファイバ共振器7のループを1回通過した後では、第2図(a)に示すような変調の浅いリップル状のM1であったものが、何回も光共振器のループを通過することにより増幅され、発振を開始し、第2図(b)に示すような定常的な発振状態の超高速光パルス列となつて取り出される。

ここで、光ファイバとして非線形性が高い材料のものを用いれば、低い励起入力で発振を開始するため、半導体レーザー等の連続光源でも発振が可能となる。

長さ100mの共振器の場合、 $10 \log (e^{(2 \times 10^{-2} \times 100)}) = 8.7 \text{dB}$ の利得を有することになる。共振器が定常的な発振を開始するためには、共振器内の損失をし、利得を g 、ファイバ長を L とすると、

$$L e^{(g-1)(L-1)} = 1 \quad (4)$$

を満たす必要がある。

すなわち、振幅決定方程式として、

$$L e^{(1+g)^2 L} = 1 \quad (5)$$

位相決定方程式としては、

$$\phi(\Omega, |E|^2) L = 2n\pi \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

を得る。式(5)の $g(|E|^2)$ は光パルスの強度が増すと、飽和が発生して減少し、定常値 E_s が決定される。一方、位相 ϕ は、強度 $|E_s|^2$ の関数として与えられる。

実際に、カラーセンターレーザーを用いて実験を行ったところ、上記の発振に成功した。ここで、光源としては波長 $1.48 \sim 1.55 \mu\text{m}$ で波長可変なカラーセンターレーザーであって、パルス幅は13ps、繰り返し周波数は100 MHz、ピーク出力は20W程度のものを用いた。光ファイバとしては、

1.525 μm に零分散をもつ分散シフトファイバを用いた。光ファイバ長は100mとした。分散シフトしたファイバに対して群速度分散が-1~-5ps/km·nm程度になる波長に励起波長を設定した。これは、式(2)から判るように、 k'' 、すなわち群速度分散が小さい場合に、その平方根に反比例して、発振の繰り返しが増すため、 k'' を小さい領域で動作させるためである。

励起波長を 1.545μm に設定した場合、得られた高速パルス発振の自己相関波形を第3図に示す。第3図より、非常に高速のパルス列が実現されており、その繰り返し周波数は1.78THz、パルス幅は約0.58psであることがわかる。

第4図は光ファイバ長を250mとした場合の励起入力と発振出力との関係を示す。第4図より、閾値は17.5mW(平均)であり、ピークパワーに換算すると13.5Wとなる。

また、励起波長を零分散波長より長波長側において変化させると、任意の繰り返し周波数のパルス列を発生させることができることになる。

得られる光パルス列は第6図に示すようになる。

[発明の効果]

以上説明したように、本発明によれば、MIの効果を光共振器内で誘起し、高繰り返し周波数のパルス発振を定常的に発生できるのであるから、高々1~10GHzのパルス列の繰り返しである現状に対して、一挙にTHzの領域まで、 10^2 ~ 10^3 倍ほど高い繰り返し周波数に高めることができる利点がある。したがって、本発明は、超高速の大容量光通信を実現するための光パルス列を発生するのに有効である。しかもまた、本発明では、励起波長を適当に変えることにより、負の分散量を変え、それにより、高速パルス列の繰り返し周波数を式(2)に従って任意に変えることができる利点がある。

さらにまた、本発明方法は、あらゆる分散性媒質中での非線形波動に対して応用できるため、流体におけるパルス列およびプラズマ中における高

光源として光パルスを用いる代わりに、高出力連続光を用いても高速パルス発振は可能となる。その構成例を第5図に示す。ここで、第1図と異なる点は、励起光源8として連続光光源を用い、ダイクロイックミラー14と第2の連続光の光源15を追加した点である。

光パルスを用いる場合、光パルスの自己位相変調効果により雜音が形成され、発振の種となつた。しかし、連続光の場合、自己位相変調効果が発生しないため、あらかじめ最初からMIが発生するようにストークスシフトした変調波を共振器7に結合する必要がある。そのためには、信号光用光源15からの光をダイクロイックミラー14を介して共振器7に導く。すなわち、光源8と光源15の差周波数が式(2)で決定されるように、信号光用光源15の波長をあらかじめシフトする。次に、共振器長の決定であるが、共振器内伝搬時間を発生するMIの繰り返しの整数倍に設定する。このようにすると、励起光と出力光との間に同期がかかり、定常的なパルス発振が可能となる。その結果

強度高速パルス列の形成も共振器を構成することによって可能となる。

4. 図面の簡単な説明

第1図は本発明装置の一実施例を示す構成図。

第2図(a)および(b)は本発明の発振の状況を説明する波形図。

第3図は本発明についての実験により観測された超高速パルス列の発振波形図。

第4図は本発明が発振現象であることを示す出力特性図。

第5図は本発明の第2の実施例を示す構成図。

第6図はその高速繰り返しパルス列発振の波形を示す波形図。

第7図はAMもしくはFMモード同期用素子を挿入した従来のモード同期レーザーの一例を示す構成図。

第8図はQスイッチ素子を共振器内に挿入した

従来のQスイッチレーザーの一例を示す構成図。

第9図は光変調器を用いるパルス発生の従来例を示す構成図。

第10図は光ファイバと回折格子対を用いるパルス発生の従来例を示す構成図である。

14…ダイクロイックミラー、

15…信号光用光源。

特許出願人

日本電信電話株式会社

代理 人

弁理士 谷 義一

1, 1' …レーザーミラー、

2 …レーザー媒質、

3 …モード同期素子、

4 …Qスイッチ素子、

5 …周波数および位相変調素子、

6 …分散素子、

7 …単一モード光ファイバ、

8 …励起光源、

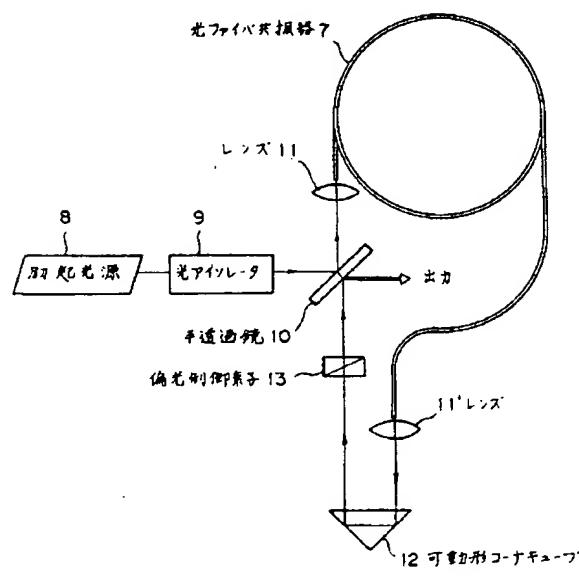
9 …光アイソレータ、

10 …半透過鏡、

11, 11' …結合レンズ、

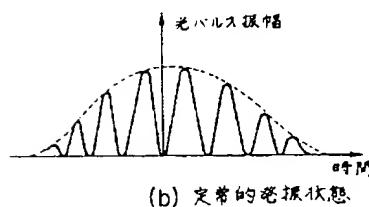
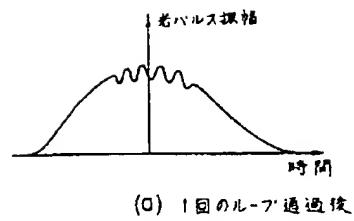
12 …可動形コーナーキューブ、

13 …偏光制御素子、



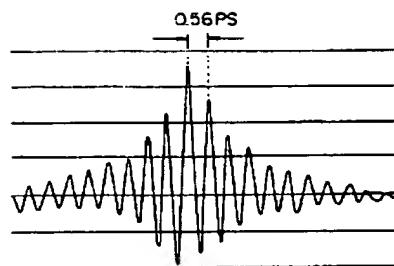
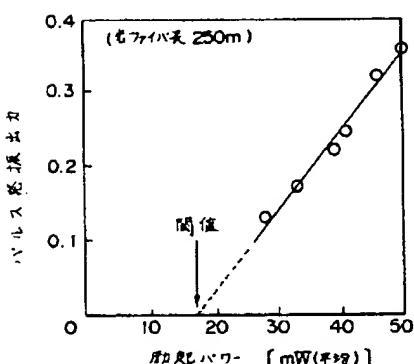
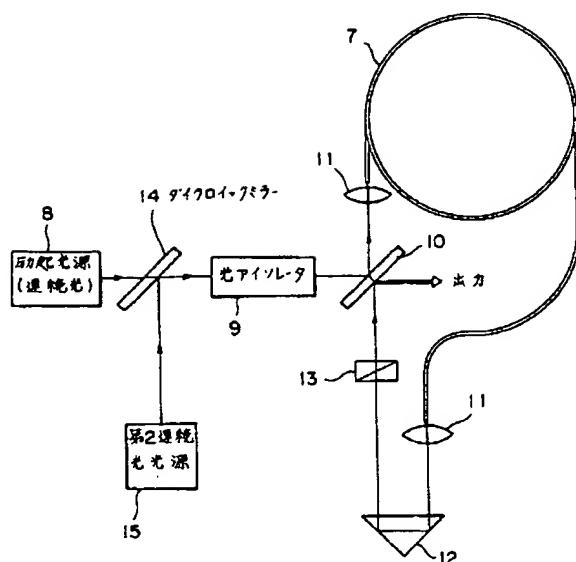
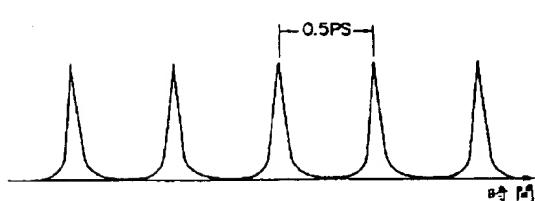
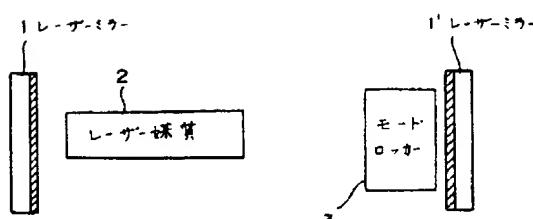
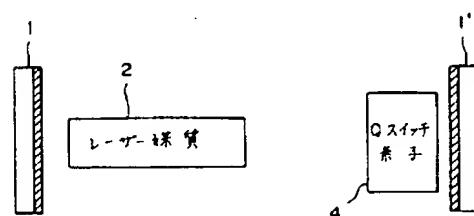
本発明実施例の構成図

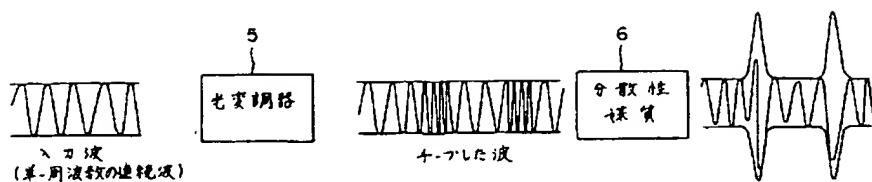
第1図



本発明による共振の説明用波形図

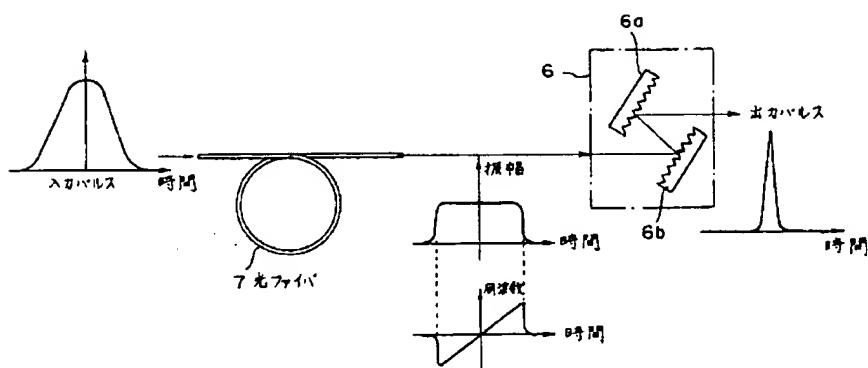
第2図

毫振波形図
第3図出力特性図
第4図本発明実施例の構成図
第5図高速繰り返しパルス列毫振波形図
第6図従来例(モード同期レーザ)の構成図
第7図従来例(Qスイッチレーザー)の構成図
第8図



従来例（方法②）の構成図

第9図



従来例（方法②）の構成図

第10図